

RF magnetron sputtering법으로 ZnO박막 제조시 기판온도에 따른 c축 배향성에 관한 연구

논문
9-2-10

A Study on c-axis Preferred Orientation at a Various Substrate Temperature of ZnO Thin Film Deposited by RF Magnetron Sputtering

이 종덕, 송 준태

(Jong-Duk Lee, Joon-Tae Song)

Abstract

The highly c-axis oriented zinc oxide thin films were deposited on Sapphire(0001) substrates by reactive RF magnetron sputtering. The characteristics of zinc oxide thin films on RF power, substrate-target distance, and substrate temperature were investigated by XRD, SEM and EDX analyses. The physical characteristics of zinc oxide thin films changed with various deposition conditions. The higher substrate temperatures were, The better crystallinity of zinc oxide thin films. The highly c-axis oriented zinc oxide thin films were obtained at sputter pressure 5mTorr, rf power 200W, substrate temperature 350°C, substrate-target distance 5.5cm. In these conditions, the resistivity of zinc oxide thin films deposited on pt/sapphire was $12.196 \times 10^9 [\Omega \cdot \text{cm}]$

Key words(중요용어) : ZnO thin film (ZnO 박막), Preferred orientation (우선 방위) Substrate temperature (기판온도), FWHM (반가폭) Amorphous (비정질)

1. 서 론

ZnO(zinc oxide)는 6mm 대칭 육방정계(hexagonal) wurtzite-type crystal로서 결정구조에서의 이방성, 비화학양론적 결합구조, 높은 굴절율, 그리고 높은 압전결합계수등의 다양한 특성을 갖는 재료로서 반도체¹⁾, 광전도성²⁾, 압전성³⁾ 박막물질로 유용하게 이용된다. 따라서 최근까지 ZnO박막이 갖는 이러한 특성을 이용해 소자 제작 및 물성 연구가 많이 진행되고 있다. 특히 사파이어 기판상에 에피 ZnO 박막을 성장시켜 고주파용 표면탄성파필터⁴⁾나 광도파관⁵⁾, 고주파 음향변환기⁶⁾등의 소자에 사용되기도 한다. ZnO박막의 제조방법으로 현재 가장 많이 사용되고 있는 대표적인 방법으로 CVD법^{7,8)}, 스퍼터법⁹⁾이 있다. CVD법은 스퍼터법보다 증착속도는 우수하나 박막의 표면이 거칠고 고온에서 증착이 이루어지는 단점이 있다.

이에 반해 스퍼터법은 우수한 표면의 평활도를

가진 조밀한 박막과 전기 및 광학적 특성이 우수한 박막의 제조가 용이하므로 일반적으로 스퍼터법이 많이 사용되고 있다. ZnO박막은 기판(substrate)에 수직인 결정학적 c축으로 우선방위현상(preferred orientation)을 나타낸다. 또한, 압전 특성을 이용하여 응용을 할 경우 높은 압전결합계수와 비저항이 요구되며, ZnO박막 성장시 c축으로 배향된 입자들의 기판에 대한 수직도가 감소할수록 압전결합계수가 떨어져 그 효율성이 낮아진다. 따라서 스퍼터법으로 ZnO 박막의 제조시 증착조건 변화 즉, 기판온도, 가스압, 증착속도, RF 전력, 기판과 타겟과의 거리에 따라 우선방위(preferred orientation)의 특성¹⁰⁾이 변하게 되며 증착변수에 따른 c축 배향성의 평가는 중요한 의미를 가진다.

본 연구에서는 고주파 음향변환기 및 SAW필터의 응용이 가능한 ZnO박막을 c축방향으로 에피성장(epitaxial growth)을 시키기 위해 사파이어(0001)기판위에 RF 마그네트론 스퍼터링법으로 증착하였다. 스퍼터링 증착시 박막의 c축 배향성에 큰 영향을 미치는 RF전력, 기판-타겟의 거리의 변화에 대한 c축 배향성을 고려하였다. 또한 양호

* : 성균관대학교 전기공학과
접수일자 : 1995년 10월 24일
심사완료 : 1996년 1월 6일

한 c축 배향성의 조건에서 기판의 온도를 변화시켜 c축배향성과 결정화 양상의 관계를 X선 회절법과 전자현미경으로 분석하여 양호한 증착조건을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험순서

본 실험에서는 ZnO박막을 증착하는데 박막표면의 평활도가 우수하고 2차전자에 의한 박막의 손상이 방지되는 반응성 R.F Magnetron sputtering 방법으로 증착하였다. 실험에 사용된 장비는 RF/DC magnetron sputter 시스템(varian, VKS 35)으로 개략적인 스퍼터링의 구조는 그림 1과 같다.

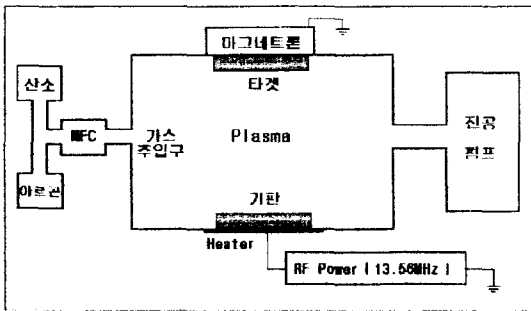


그림 1. RF 마그네트론 스퍼터링의 개요도
Fig. 1. Schematic diagram of the RF magnetron sputtering system

반응성스퍼터링으로 박막을 증착시키는 것은 여러가지 증착변수들이 복합된 매우 복잡한 과정이며, 각 증착변수에 따라 박막의 특성이 매우 민감하게 변한다. 본 실험에서는 3RF 전력, 기판-타겟의 거리의 증착조건을 변화시키면서 기초실험을 한 후 양호한 조건에서 기판온도를 변화시키면서 사파이어(0001)기판위에 ZnO박막을 증착하였다. 기판으로 사용된 사파이어는 지름이 6mm, 두께가 2mm로 c축으로 가공하여 정밀하게 polishing하였다. 실험에 사용된 타겟은 순도가 5N인 소결체 ZnO타겟를 사용하였으며, 증착전에 기판으로 사용된 사파이어(0001)기판을 아세톤, 알콜, 증류수속에서 각각 10분간 초음파 세척을 한 후 질소를 이용해 송풍 건조하였다. 또한, 스퍼터링을 하기전에 챔버내 불순물을 최대한 제거하기 위해 챔버의 초기 진공도는 4.5×10^{-6} Torr로 형성시켰으며, MFC와 main valve를 이용하여 챔버 내부의 압력을 일정하게 유지시켰다. 그런 다음, RF전력을 가

하여 플라즈마를 형성 유지시켰고, 이때 고순도의 아르곤과 산소를 사용하였다. 그리고 타겟 표면에 형성된 불순물과 초기의 불안정한 상태의 플라즈마를 안정화 시키기 위해 shutter를 닫은 상태에서 아르곤과 산소 분위기에서 각각 15분씩 pre-sputtering 하였으며, 그 후에 shutter를 열어 ZnO 박막을 증착하였다.

2.2. ZnO박막의 구조적인 분석

증착된 박막의 배향성을 분석하기 위해 XRD (RIGAKU:X-Ray Diffractometer)를 사용하였다. 이때 X-Ray는 Cu α line ($\lambda=1.542\text{\AA}$)을 사용하였으며, 스텝폭과 주사속도는 각각 0.02, 0.2(sec)이었다. 또한, 박막의 우선방향성 정도를 알아보기 위하여 X선의 입사각도와 goniometer의 각도를 (0002)면의 회절각으로 고정시킨후 5° - 35° 범위에서 시편을 rocking시켜 주면서 X-Ray curve를 측정하였으며, ZnO 압전박막층의 표면을 조사하기 위해 주사전자 현미경(SEM : Leica:STREOSCAN 440)으로 관찰하였고, 박막의 성분은 SEM에 부착된 EDX(Energy Dispersive X-ray microanalyzer : Leica)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. RF전력에 따른 ZnO 배향성 평가

그림2는 스퍼터링 압력 5×10^{-3} Torr, 기판온도 300°C , Ar/O₂ 비 50/50, 기판-타겟 거리 6cm의 조건에서 RF전력의 변화에 따른 증착속도의 변화를 나타내었다. RF전력이 증가함에 따라 증착속도는 거의 직선적으로 비례하여 증가하는 경향을 보인다.

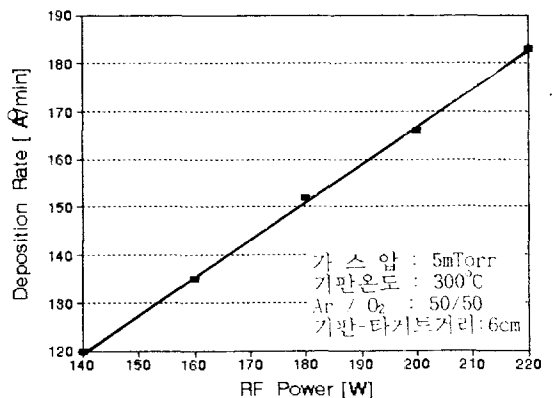


그림 2. RF전력의 변화에 따른 증착속도의 변화
Fig. 2. Variations in deposition rate as a function of RF power.

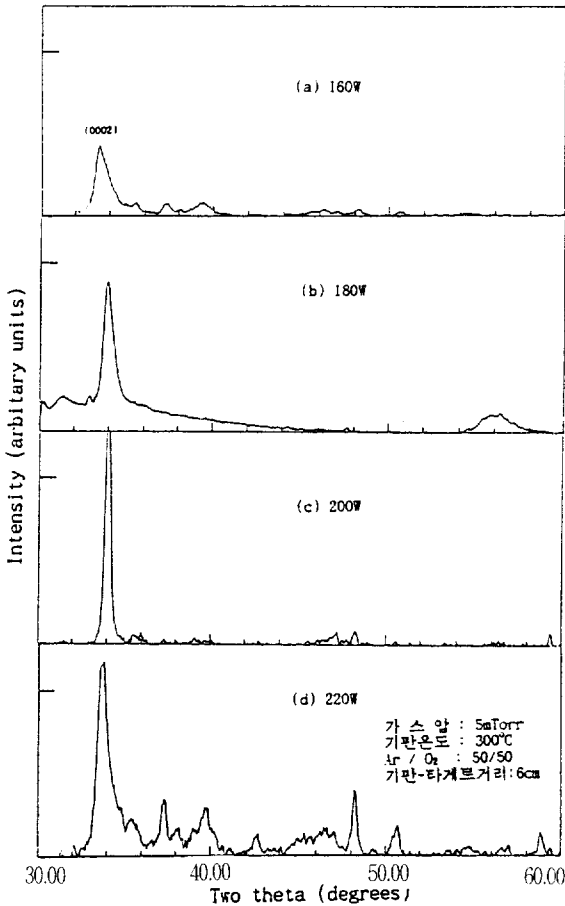


그림 3. RF전력의 변화에 따른 ZnO의 XRD의 세기 (a) 160W (b) 180W (c) 200W (d)220W

Fig. 3. XRD intensities of ZnO as a function of RF power. (a) 160W (b) 180W (c) 200W (d)220W

그림3은 위의 증착조건에서 RF전력을 160W, 180W, 200W, 220W로 변화시켜 1시간동안 증착시킨 박막의 X선 회절 결과를 나타내었다. XRD 측정 결과 RF전력이 증가할수록 (0002)면으로 우선방위성(preferred orientation)을 가지고 성장하는 것을 알 수 있으며 200W에서 c축 배향성이 우수하였다. 이는 가해주는 RF전력이 증가하면 스퍼터링되어 기판에 도착하는 물질 입자들의 에너지도 증가하고 타겟으로 부터 방사되어 기판에 충돌하는 아르곤입자들의 에너지도 증가하므로 결국 기판위 부착원자들의 표면이동도는 증가하게 되어 결정화가 이루어진다고 사료된다. 또한 RF전력이 낮을때는 증착한 박막은 비정질상을 나타내고 증

착속도가 너무 낮아 실효성이 없으며, 그림d의 220W에서는 육방정 ZnO의 (0002), (10 $\bar{1}2$)의 면과 입방정 ZnO₂ (200)면의 성장과 불순물이 혼합된 면정상이 나타난다. 이는 rf전력을 220W로 증착했을 경우 필름막이 매우 불균일하거나 스퍼터된 입자가 기판에서 벗겨지는 경우가 발생하였는데 이는 보다 높은 입자에너지로 인하여 기판과의 부착력(adhesion)이 약화되어 re-sputtering의 영향으로 필름막의 각 면들이 상대적으로 큰 차이가 없이 성장을 하여 우선방위의 성장이 이루어지지 않는다고 사료된다. 따라서 본 실험에서는 200W에서 가장 양호한 상태를 나타내었다.

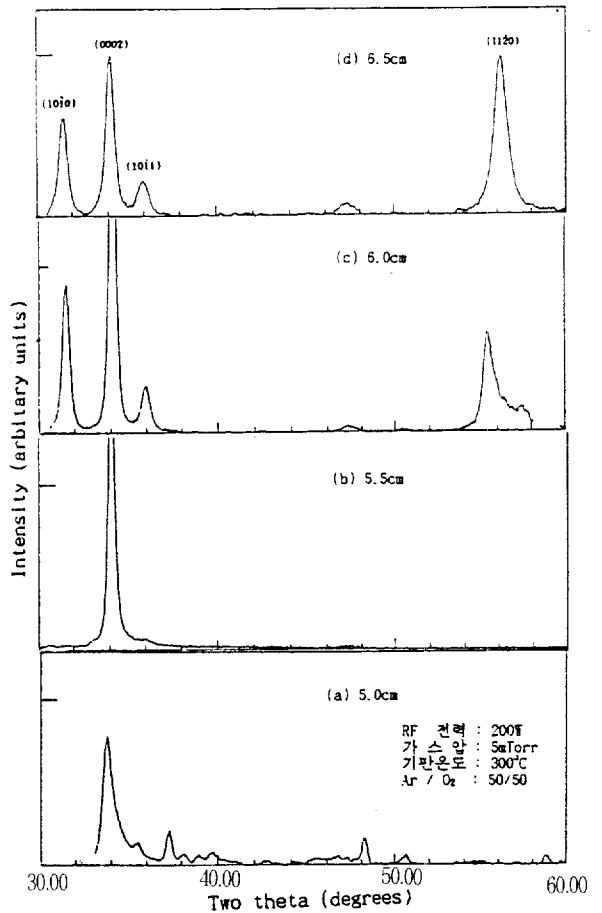


그림 4. 기판-타겟 거리의 변화에 따른 ZnO의 XRD의 세기 (a) 5.0cm (b) 5.5cm (c) 6.0cm (d) 6.5cm

Fig. 4. XRD intensities of ZnO as a function of substrate-target distance (a) 5.0cm (b) 5.5cm (c) 6.0cm (d) 6.5cm

3.2. 기판-타겟 거리의 변화에 따른 ZnO 결정 방향성

그림4는 스퍼터링 압력 5×10^{-3} Torr, RF전력 200W, 기판온도 300°C, Ar/O₂ 비 50/50의 증착조건에서 기판과 타겟 거리를 5.0cm, 5.5cm, 6.0cm, 6.5cm로 변화시켜 1시간 동안 증착한 ZnO 박막의 XRD결과를 나타내었다. X선 회절결과 기판-타겟의 거리가 멀어질수록 (0002)면의 성장이 억제되었고, 6.0cm, 6.5cm 에서 증착한 박막은 (10 $\bar{1}$ 0), (0002), (10 $\bar{1}$ 1), (11 $\bar{2}$ 0)의 혼합된 면으로 성장이 이루어졌으며 5.5cm일때 가장 양호한 (0002)면의 c축 배향성을 나타내었다. 이는 기판-타겟의 거리 변화는 기판에 도달하는 입자의 운동 에너지에 크게 영향을 줄 것으로 생각되는데, 입자들이 적절한 크기의 운동 에너지를 가질때에만 박막의 표면과 수직인 c축으로의 성장이 이루어지는 것으로 사료된다. 또한 5.0cm일때 RF전력이 200W일때와 마찬가지로 스퍼터된 입자가 기판과의 부착력이 떨어져 박막에 많은 결함이 발생하거나 벗겨지는 현상이 나타났으며, 이는 입자의 에너지가 거리가 가까워짐에 따라 증가하기 때문이라고 사료된다. 그러므로 입자의 에너지의 증가는 c축 배향성을 증가시키지만 상대적으로 높은 에너지의 증가는 박막에 많은 결함과 결정성을 약화시킨다는 결론을 얻을 수 있었다.

3.3. 기판온도의 영향

3.3.1. 기판온도에 따른 증착속도

그림5는 스퍼터링 압력 5×10^{-3} Torr, RF 전력 200W, Ar:O₂ 비가 50:50, 기판-타겟 거리 5.5cm에서 온도변화에 따른 ZnO박막의 증착속도를 나타내었다. 온도의 증가에 따라 증착속도는 거의 일정함을 보이고 있으나 400°C에서는 약간의 감소가 나타나는 것으로 보아 증착된 ZnO분자들의 재증발(re-evaporation)이 일어나는 것으로 추측되며 결정성장은 나빠질 것으로 예상된다.

3.3.2. 기판온도에 따른 XRD 및 rocking curve

그림6은 위의 증착조건에서 기판의 온도의 변화가 박막의 c축의 배향성에 미치는 영향을 분석하기 위해 기판온도를 250°C, 300°C, 350°C, 400°C로 변화시켜 1시간 동안 증착시킨 ZnO박막의 X선 회절 결과를 보여 준다. XRD 회절결과 기판온도의 변화에 관계없이 (0002)면의 우선방위성을 보이고 있으며 본 실험에서는 350°C 에서 가장 양호한

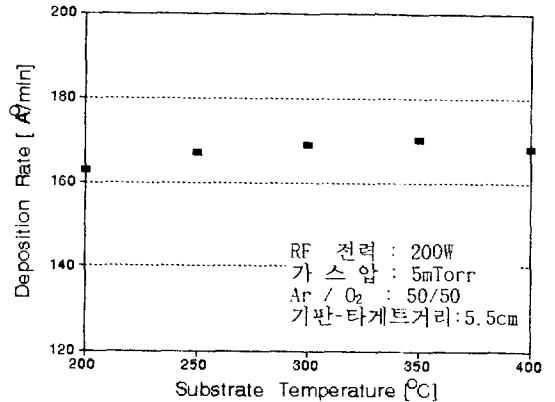


그림 5. 기판온도의 변화에 따른 증착속도의 변화
Fig. 5. Variations in deposition rate as a function of substrate temperature.

c축 배향성을 보였다. 그러나 상대적으로 낮은 온도에서 증착된 박막은 intensity가 작고(11 $\bar{2}$ 0)면이 혼합된 양상을 보이며, 기판온도가 증가함에 따라 (0002)면의 양호한 c축 배향성을 나타낸다. 이는 기판표면의 온도가 증가하면 스퍼터된 원자가 기판표면에서 이동할 수 있는 능력이 증가하여 에너지적으로 안정한 위치를 충분히 찾아 갈 수 있기 때문에 박막의 결정성은 증가한다고 생각된다. 또한, 400[°C]에서는 XRD intensity가 오히려 감소하는 양상을 보였는데 이는 기판온도의 증가로 인하여 증착된 입자가 증발하는 현상이 결정화가 이루어지지 못한 이유로 사료되지만 이에 대한 원인은 더욱 연구, 분석이 요구되며 본 실험에서는 350°C 에서 가장 양호한 c축 배향성을 보였다. 또한, XRD로 분석한 결과를 토대로 평균 결정 지름(D)^{9H10}을 식1에 의하여 구한 값을 표1에 나타내었으며, 그림7은 기판온도가 350°C일때 (0002)회절선의 반가폭(FWHM)을 구한 예이다. 이 때 ZnO powder의 (0002)면의 2θ와 비교해 보면 편차가 0.31°로 낮은값을 나타내었다.

$$D = 0.94\lambda / X_{rad} \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, D : 평균 결정 지름
- λ : X-ray 반사파장 (= 1.542 Å)
- θ : (0002)면에 대한 회절각
- X_{rad} : (0002)회절선의 최대강도의 반가폭(FWHM)의 radian값

[표1]의 결과 기판의 온도가 증가함에 따라 반가폭(FWHM)이 0.7°에서 0.3°로 작아지는 경향을 보이며, 결정의 크기는 상대적으로 증가하는 경향을 나타내 보이고 있다. 이는 온도의 증가는 결정화를

표 1. 시편의 FWHM과 Grain size의 크기

Table 1. Amplitude of FWHM and Grain size for samples

기판온도	반가폭(FWHM)	Grain size
250°C	0.70°	142 Å
300°C	0.48°	209 Å
350°C	0.30°	334 Å

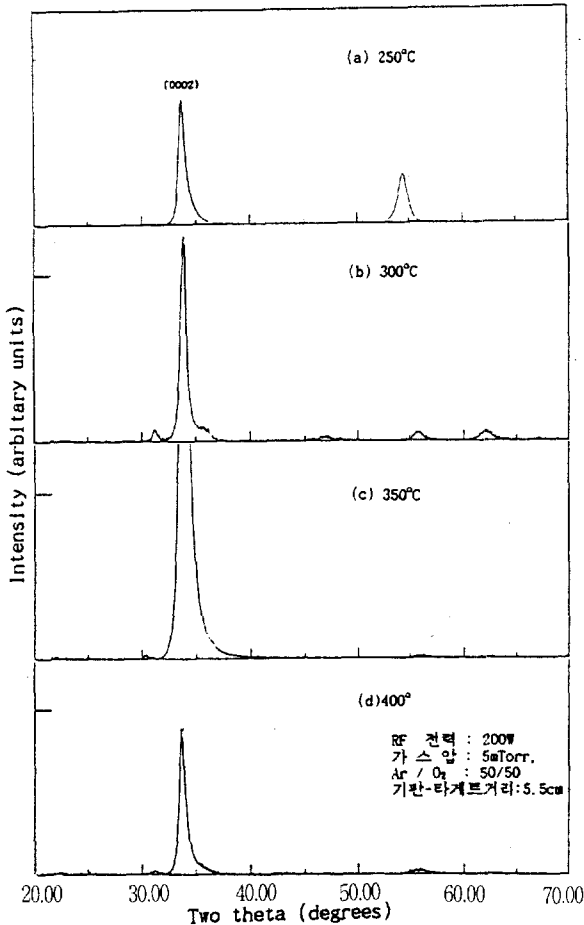


그림 6. 기판온도 변화에 따른 ZnO의 XRD 의 세기 (a) 250°C (b) 350°C (c) 350°C (d) 400°

Fig. 6. XRD intensities of ZnO as a function of substrate temperature.

(a) 250°C (b) 350°C (c) 350°C (d) 400°

향상시킨다는 예상을 할 수 있다.

그림8은 증착된 박막의 기판과의 수직도를 알아보기 위해 c축 배향성이 가장 우수한 기판온도가

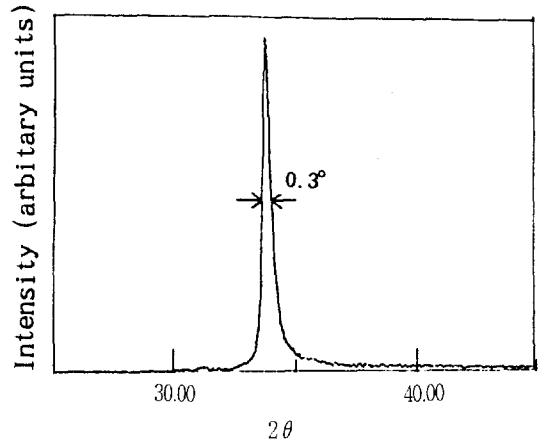


그림 7. 기판온도가 350°C일때의 반가폭 측정

Fig. 7. FWHM measurement for substrate temperature 350°C

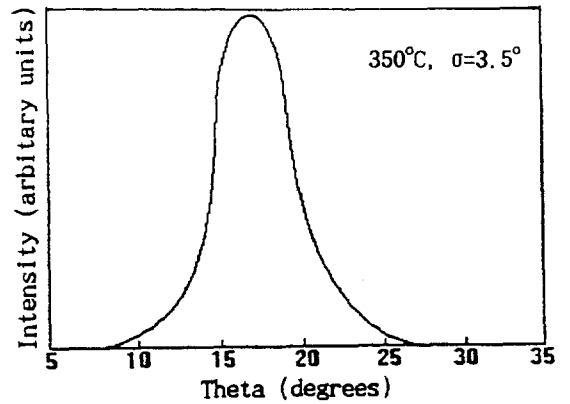


그림 8. 기판온도가 350°C일때 (0002) peak의 X-ray rocking curve 의 표준편차(σ = 3.5°)

Fig. 8. Standard deviation(σ) of X-ray curve of (0002) peak at substrate temperature 350°C, (σ=3.5°)

350°C의 조건에서 증착한 X선 rocking curve의 측정을 보여준다. X선 rocking curve의 측정은 어떤 결정면의 박막내에서의 분포 정도를 알아보는 방법으로 표준 편차를 이용하여 우선 방향성의 정도를 나타내며 압전재료로의 응용시 표준편차가 6°이내의 값을 가질 경우 양호한 수직도와 큰 압전 결합계수가 나타난다고 보고¹¹⁾되어 있다. 본 실험에서 제조한 시편의 표준편차는 기판온도가 350°C일때 3.5°의 값으로 양호한 박막을 얻을 수 있었으며 압전재료의 응용에 적합함을 알 수 있다.

3.3.3. ZnO박막의 미세구조 및 성분분석

사진1은 c축 배향성이 가장 우수한 기판온도가 350°C의 조건에서 증착한 시편의 미세구조를 SEM으로 5만배로 측정하여 나타낸 것으로 입계의 구분이 명확한 결정의 성장이 보이며 Grain size는 약 500Å의 크기를 가진다. 그러나 기판온도가 350°C 이하에서는 입자의 크기가 약 200Å의 비정질(amorphous)을 나타내었고 표1에 제시한 결정의 크기와는 약간의 차이는 있으나 기판의 온도가 증가함에 따라 결정의 성장이 향상되는 경향은 잘 일치하였다. 따라서 [111]의 방정식은 grain size의 절대치를 나타낼 수는 없으나 조건에 따른 결정성장의 경향은 확인할 수 있었다.

사진2는 증착된 박막의 횡단면(cross-sectional)의 구조를 나타낸다. ZnO 박막의 표면은 모든 조건에서 embosom형상을 보이며, 단면은 columnar 구조를 갖고 있다.

또한, 그림9는 EDX를 이용하여 박막의 조성을 분석한 결과를 나타내었다. 분석 결과로 Zn과 O의 Atomic rate가 49.73:51.27로 거의 1:1로 분포하고 있으며, 조건에 관계없이 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 불순물로는 Ar이 함유되었으며 이는 박막 제조과정에서 플라즈마와 기판사이에 걸리는 전압차에 의해 충돌한 Ar 양이온에 의해 함유된 것으로 생각된다. 그러므로 ZnO박막의 성장시 기판온도는 모든 경우 c축 우선방위성을 나타내고 있으나 결정화의 정도에 큰 영향을 미치며 스퍼터링시 기판에 따라 적절한 스퍼터링 온도가 존재한다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 사파이어(0001)기판에 위와 같은 증착조건으로 양호한 c축 배향성을 가진 박막을 제조할 수 있으며, 압전성재료의 응용에 적합한 결정구조를 성장시킬 수 있다.

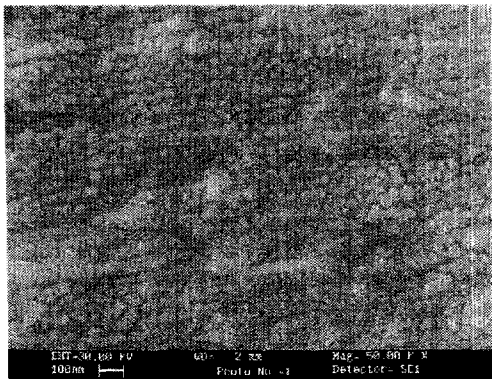


사진 1. ZnO박막의 미세구조
Photo.1. SEM micrographs og ZnO thin film

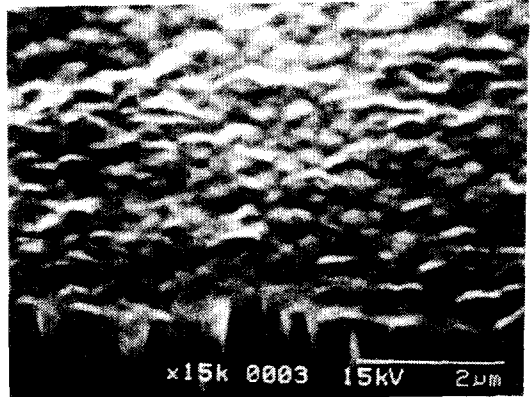


사진 2. ZnO 박막의 단면 형상
Photo.2. Cross-sectional image of ZnO thin film. .

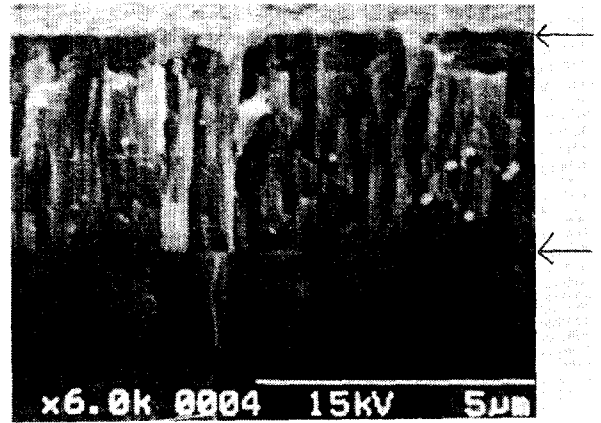


사진 3. 4 μm 증착된 ZnO 박막의 SEM 사진
Photo.3. SEM micrographs of ZnO thin film deposited 4 μm.

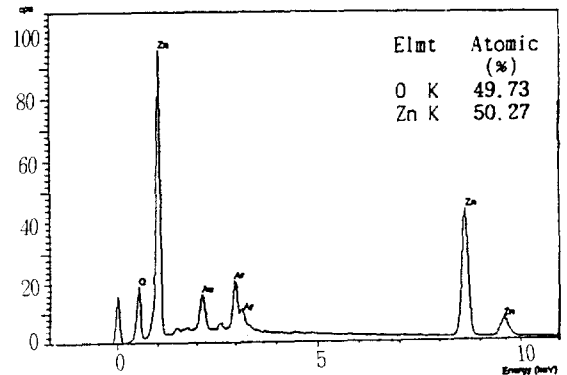


그림 9. 사파이어(0001) 기판위에 증착한 ZnO박막의 EDX 분석
Fig. 9. EDX Spetrum of ZnO thin film on Sapphire(0001)

3.3.4. ZnO박막의 비저항 측정

그림10는 사파이어(0001)기판에 DC스퍼터로 백금을 1000A° 하부전극을 형성시킨 후 가스압 5 mTorr, RF전력 200W, 기판온도 350°C, Ar/O₂ 비 50/50, 기판-타겟 5.5cm의 스퍼터링조건으로 4시간동안 증착하여 약 4 μm 증착된 ZnO 박막의 XRD 회절 결과를 보여준다. 그림에서 2theta값이 34°부근의 값이 ZnO (0002)면의 peak이며 45°부근의 peak은 백금의 (220) 면의 peak을 나타낸다. XRD결과 양호한 c축의 배향성이 이루어졌음을 알 수 있다.

사진3은 위 조건으로 증착한 박막의 SEM사진으로 두께가 약 4 μm를 보이며 양호한 columnar structure 의 형상을 보인다. 또한, 압전성 응용에 사용하기 위해서는 1.5×10⁶[Ωcm] 이상의 높은 비저항 값을 가져야 하고^[12], 제작된 박막의 비저항은 617 programmable electrometer를 사용하여 측정된 결과 비저항값은 12.196×10⁹[Ωcm]으로 높은 비저항값을 보였다.

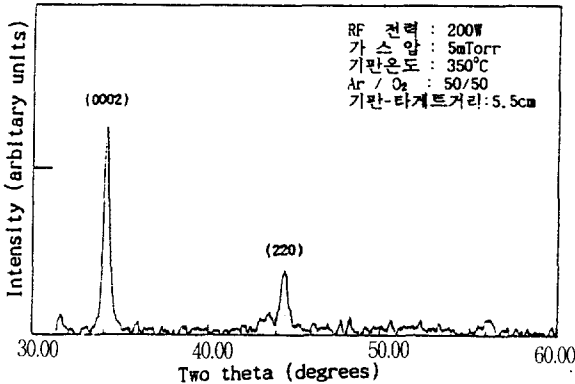


그림 10. Pt/Sapphire(0001) 기판상에 증착한 ZnO 박막의 XRD의 세기

Fig. 10. XRD intensities of ZnO thin film on Pt/Sapphire(0001) substrate.

4. 결 론

RF magnetron sputtering법으로 사파이어(0001) 기판위에 제조한 ZnO의 박막의 증착변수에 따른 c축 배향성에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

1. RF 전력의 증가에 따라 증착속도는 선형적인 증가를 보였으며 기판에 수직인 (0002)면의 peak intensity가 증가하여 c축배향성이 증가하였다.

2. 기판-타겟 거리가 상대적으로 멀어질수록 혼합된 면이 성장되며, 5.5cm일때 높은 c축 배향성을 가지는 ZnO박막을 얻을 수 있었다.
3. 기판온도는 ZnO박막의 증착속도에는 큰 영향을 미치지 않으나, 결정성장의 가장 중요한 변수로 작용하였으며, 기판온도의 증가에 따라 결정의 성장이 향상되었고, 이는 XRD 측정의 반가폭(FWHM)의 감소와 같은 경향을 보였다.
4. ZnO박막은 기판온도의 변화에는 관계없이 columnar structure 및 embosom의 형상 나타내었고, 기판온도 낮을수록 아몰퍼스상으로 나타났다.
5. 스퍼터링 압력 5mTorr, RF 전력 200W, 기판온도 350°C, Ar/O₂ 비 50:50, 기판-타겟 거리 5.5cm의 스퍼터링조건에서 표준편차가 약 3.5°, 결정의 크기가 약 500Å°의 높은 c축 배향성을 가진 ZnO박막을 성장시킬 수 있었다.
6. Pt/Sapphire기판위에 압전층이 4 μm인 ZnO박막의 비저항은 12.196X10⁹[Ω.cm]으로 매우 높은 값을 보였다.

REFERENCES

1. D.L.Polla, H.Yoon, T.Tamagawa, and K.Voros, "Integration of surface micromachined ZnO sensors in n-well CMOS technology", IEEE, 1989
2. H.Nanto, T.Minami, S.Shooji, and S.Takata, "electrical and optical properties of zinc oxide films prepared by rf magnetron sputtering for transparent electrode applications", J. Appl. Phys. 55(4), pp1029-1034, 1979
3. B.Hadimioglu, L.J.La Comb, Jr.,D.R.Wright, B.T.Khuri-Yakub, and C.F.Quate "High efficiency multiple layer ZnO acoustic transducers at millimeter-wave frequencies", Appl. Phys. Lett. 50(23), 8. June 1987
4. T.Mitsuyu, S. Ono, and K. wasa, "Structure and SAW properties of RF sputtered single-crystal films of ZnO on Sapphire," J. Appl. Phys., vol.44, pp. 1061- 1071, Mar. 1973.
5. J.M.Hammer, D.J.Channin, M.T.Duffy, and J.P.Wittke "Low-loss epitaxial ZnO optical waveguide", Appl. Phys. Lett., Vol. 21, No. 8, 15 October 1972.

6. Thomas M.Reeder, "characteristic of Microwave Acoustic Transducers for Volume Wave Excitation", IEEE TRANS ON MTT,vol.17,pp927,1969.
7. J.Aranovich, A.Armano and R.Bube, J.Vac. Sci. Technol., 16(1979) 994
8. T.Shiosaki, S.Ohnishi and A.Kawabata, "Optical properties of single-crystal-line ZnO film smoothly CVD on intermediately sputtered thin ZnO film on Sapphire", J. Appl. Phys. 50(5), May. pp3113-3117, 1979
9. S.Maniv and A.Zangvil, "Controlled texture of reactively RF sputtered ZnO thin film", J.Appl. Phys., 49(1978) 2787
10. S.B.Krupanidhi and M. Sayer, "Position and pressure effects in rf magnetron reactive sputter deposition of piezoelectric zinc oxide", J. Appl. Phys. 56(11), 1984
11. M.Minakata, N.Chabachi and Y.kikuchi, 電子通信學會技術研究報告, US 73-37, 25(1974)
12. H.W.Lehmann and R.Widmer, "RF sputtering of ZnO shear wave transducer", J. Appl. Phys. Vol, 44, no.9, pp3868,1973.

저자소개



이종택

1964년 10월 17일생. 1988년 2월 성균관대학교 공대 전기공학과 졸업. 1990년 2월 성균관대학교 대학원 졸업(석사). 1996년 현재 동 대학원 박사과정 재학 중.



송준태

1952년 2월 15일생. 1975년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 미국 Rensseler Polytechnic Institute 연구교수. 현재 성균관대학교 공대 전기공학과 교수.